

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.11

仿星器复杂曲面永磁体的数值仿真 与增材制造技术研究

孟晓伟, 贺可太*, 董浩, 杜扬威

北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083

摘要: 为解决仿星器磁约束聚变装置中复杂三维磁场位形的精确控制问题, 突破传统线圈磁体系统在空间布局 and 运行维护方面的技术瓶颈, 系统研究了复杂曲面永磁体的有限元数值仿真方法与增材制造技术方案。采用 REGCOIL_PM 电流势优化方法获得仿星器永磁体结构的三维形状, 该方法基于 Tikhonov 正则化策略在等离子体表面磁场精度与永磁体复杂度之间实现优化平衡。针对永磁体具有空间扭曲轨迹和连续变化截面的几何特征, 开发了基于 MATLAB 的 STL 网格自动生成程序, 实现了复杂几何的精确数字化表征。建立了 COMSOL 三维静磁场有限元模型, 通过插值函数技术实现了磁化强度和磁化方向在三维空间的连续变化配置。对 NCSX 构型仿星器开展的三维仿真分析表明, 永磁体系统在等离子体表面产生的法向磁场呈现明显的非轴对称分布特征, 磁场强度的空间变化范围覆盖正负极性区域。仿真结果与 REGCOIL_PM 计算结果磁场的归一化均方根误差低于 5%, 与理想等离子体约束磁场分布的最大相对偏差同样控制在 5% 以内, 满足磁约束聚变对磁场精度的工程要求。磁场分布成功再现了仿星器构型的多重周期性特征。误差空间分布分析揭示, 磁场梯度剧烈变化区域和等离子体边界高曲率位置的误差相对较大, 主要源于几何离散化偏差、磁化向量插值误差和有限元网格分辨率的综合影响。在增材制造方案方面, 提出采用激光选区熔化等增材制造工艺直接成型钕铁硼或铝镍钴永磁体。针对空间变化磁化方向的技术难题, 设计了多自由度程控充磁系统, 采用迭代充磁与全场测量相结合的闭环控制方法, 补偿充磁过程的交叉耦合效应。本研究建立了仿星器复杂曲面永磁体从优化设计、数值仿真到增材制造的完整技术体系, 验证了永磁体替代线圈磁体的技术可行性, 为磁约束聚变装置提供了新型永磁体技术方案。

关键词: 仿星器; 永磁体; 磁场分布; 有限元仿真; 增材制造

中图分类号: TL62TG665 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)04-0087-11

Numerical Simulation and Additive Manufacturing Technology Research on Complex Curved Surface Permanent Magnets for Stellarators

MENG Xiaowei, HE Ketai*, DONG Hao, DU Yangwei

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: To address the challenge of precise control over complex three-dimensional magnetic field configurations in stellarator magnetic confinement fusion devices and overcome technical bottlenecks of conventional coil magnet systems in spatial arrangement and operational maintenance, this study systematically investigated finite element numerical simulation methods and additive manufacturing technology schemes for complex curved surface permanent magnets. The REGCOIL_PM current potential optimization method was employed to obtain the three-dimensional geometry of stellarator permanent magnet structures, which achieved an optimized balance between plasma surface magnetic field accuracy and permanent magnet complexity based on the Tikhonov regularization strategy. Considering the geometric characteristics of permanent magnets featuring spatially twisted trajectories and continuously varying cross-sections, a MATLAB-based automatic STL mesh generation program was developed to achieve precise digital characterization of complex geometries. A

收稿日期: 2025-12-11 修回日期: 2026-01-30

作者简介: 孟晓伟(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究永磁体增材制造及磁场分布。E-mail: mengxiaowei@tju.edu.cn。

通讯作者: 贺可太(1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究永磁体增材制造制备及性能优化。E-mail: heketai@ustb.edu.cn。

three-dimensional magnetostatic finite element model was established in COMSOL, where the continuous spatial variation of magnetization intensity and direction was configured through interpolation function techniques. Three-dimensional simulation analysis conducted on the NCSX-configuration stellarator demonstrated that the permanent magnet system generated normal magnetic field distributions on the plasma surface exhibiting pronounced non-axisymmetric characteristics, with spatial variation ranges spanning both positive and negative polarity regions. The normalized root mean square error between simulation results and REGCOIL_PM calculations remained below 5%, while the maximum relative deviation from the ideal plasma confinement magnetic field distribution was similarly controlled within 5%, meeting the engineering requirements for magnetic field accuracy in magnetic confinement fusion. The magnetic field distribution successfully reproduced the multiple periodicity features characteristic of stellarator configurations. Spatial error distribution analysis revealed that regions with dramatic magnetic field gradient variations and high-curvature locations at the plasma boundary exhibited relatively larger errors, primarily attributed to the combined effects of geometric discretization deviations, magnetization vector interpolation errors, and finite element mesh resolution. Regarding the additive manufacturing scheme, laser powder bed fusion and other additive manufacturing processes were proposed for direct fabrication of neodymium-iron-boron or aluminum-nickel-cobalt permanent magnets. To address the technical challenge of spatially varying magnetization directions, a multi-degree-of-freedom programmable magnetization system was designed, employing a closed-loop control method combining iterative magnetization with full-field measurement to compensate for cross-coupling effects during the magnetization process. This research established a complete technical framework for complex curved surface permanent magnets in stellarators, spanning from optimization design and numerical simulation to additive manufacturing, validated the technical feasibility of replacing coil magnets with permanent magnets, and provided a novel permanent magnet technology solution for magnetic confinement fusion devices.

Keywords: stellarator; permanent magnet; magnetic field distribution; finite element simulation; additive manufacturing

引用格式: 孟晓伟, 贺可太, 董浩, 等. 仿星器复杂曲面永磁体的数值仿真与增材制造技术研究[J]. 电焊机, 2026, 56(4): 87-97.

Citation: MENG Xiaowei, HE Ketai, DONG Hao, et al. Numerical Simulation and Additive Manufacturing Technology Research on Complex Curved Surface Permanent Magnets for Stellarators[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 87-97.

0 引言

磁约束核聚变作为解决人类能源问题的重要途径,正面临着从实验探索向工程实现的关键转变^[1-2]。仿星器作为磁约束聚变装置的重要技术路线,通过纯磁场位形实现等离子体约束,具有稳态运行能力强、本征无扰动、无需等离子体电流驱动等显著优势,是国际聚变界重点发展的方向之一^[3]。然而,仿星器所需的复杂三维非轴对称磁场位形对磁体系统提出了极高要求,成为制约其工程实现的核心瓶颈^[4]。

传统仿星器采用复杂的非平面三维线圈系统生成三维磁场位形,面临诸多技术挑战^[5]。首先,非平面线圈的三维扭曲几何导致制造难度极大,对加工精度和装配公差的要求高,制造成本高昂。其次,超导线圈系统必须在低温环境工作,需要配备复杂的低温冷却系统,不仅建设投资巨大,而且持

续运行的冷却费用成为装置运维的沉重负担。此外,复杂线圈的空间布局严重限制了对装置内部的可达性,给维护检修和部件更换带来极大困难。这些技术瓶颈使得传统仿星器的建造周期长、成本高,制约了仿星器技术的推广应用^[6-7]。

为突破传统线圈系统的技术限制,近年来国际聚变界提出了采用永磁体阵列替代部分或全部非平面线圈的创新方案^[8],如图1所示。该方案的核心思想是利用永磁体阵列提供三维磁场整形功能,配合简单的平面线圈提供环向磁场,从而大幅简化装置结构^[7,9-10]。永磁体方案具有多重优势:无需低温系统和持续能耗,全寿命周期成本显著降低;材料本征稳定,维护需求低。Hammond等^[11-12]基于NCSX构型仿星器开展了永磁体几何概念研究,探索了正方体和扇形六面体等标准化几何方案。Zhang等^[3]针对ESTELL构型开发了立方体永磁体阵列的连续-截断优化方法,将离散优化问题转化

为连续非线性优化问题求解。国际上 PM4Stell 项目^[6]展示了利用均匀立方体永磁体生成 NCSX 构型仿星器磁场分布的可行性。MUSE 项目^[7]作为世界首个永磁体仿星器进一步验证了该技术路线的实用前景。

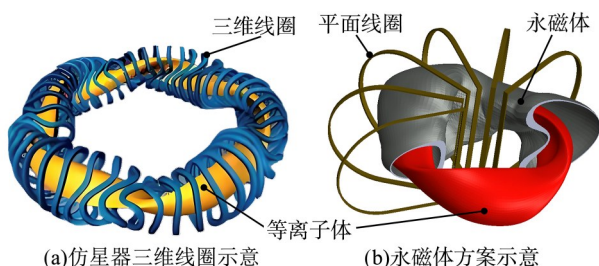


图1 永磁体加平面线圈代替三维复杂线圈方案示意

Fig. 1 Schematic of replacing 3D complex coils with permanent magnets and planar coils

在永磁体阵列设计方法方面,现有研究主要集中于优化算法的发展^[6,13]。REGCOIL 程序^[14]基于电流势方法和 Tikhonov 正则化策略,通过快速求解线性最小二乘问题获得最优电流势分布,其扩展版本 REGCOIL_PM^[15]可计算永磁体的空间分布形状。该方法将问题表述为正则化最小二乘问题,通过构建感应矩阵和设置边界条件,求解对称线性方程组。FAMUS 程序^[16-17]基于磁偶极子阵列优化任意分布的磁矩,提供完整的设计灵活性。

为推动永磁体仿星器工程化进展,近期研究聚焦于标准化几何的永磁体设计,采用规则立方体阵列^[17-19]以简化制造和装配。相关优化方法包括逐个优化磁体方向的全离散方法^[20]和先连续优化后截断的混合方法^[16,21]。这些进展为永磁体仿星器的理论设计奠定了基础,但在仿真验证和工程实现方面仍存在明显不足。

现有研究存在以下几方面局限性。首先,仿真方法存在空白。仿星器永磁体优化程序基于理想化假设(无限薄电流面、线性叠加原理)快速计算磁场分布,但未完全考虑实际永磁体的体积效应、非线性磁路和边界条件的影响,缺乏对优化结果的精确有限元验证。这些简化假设与真实物理过程存在差异,优化得到的磁化分布能否在三维有限元模型中准确再现目标磁场分布尚未得到系统验证^[22]。其次,几何设计受限于标准化。为降低制造复杂度,现有方案采用规则立方体阵列或其他简单几何

体阵列,但标准化几何难以精确匹配仿星器复杂的三维扭曲轨迹,导致磁场精度损失和材料冗余。立方块的离散排列在曲率较大区域产生阶梯效应,局部磁场梯度难以准确控制。第三,离散化引入优化误差。磁化方向的连续优化结果截断为有限离散方向时,特别是当允许方向较少时(如仅6个面法向),截断误差显著影响全局最优性,且难以定量评估误差传播机制。第四,制造实现技术缺失。空间连续变化的磁化方向如何通过工程手段实现,相关的充磁技术、精度控制和验证方法尚未建立,制约了理论设计向工程实施的转化。

针对上述不足,本文提出复杂曲面永磁体的有限元仿真与增材制造技术方案。主要创新点包括:(1)建立了仿星器复杂曲面永磁体系统的三维静磁场有限元仿真方法,开发基于插值函数的空间变化磁化向量场建模技术,实现在 COMSOL 平台上对复杂曲面永磁体磁场分布的精确数值求解,首次对 REGCOIL_PM 优化结果进行完整的有限元验证;(2)突破标准化几何的限制,提出采用激光选区熔化等增材制造工艺直接成型复杂三维扭曲轨迹的永磁体^[23-24],实现几何形状与磁化分布的连续优化,消除离散化截断误差;(3)设计多自由度程控充磁系统及迭代充磁闭环控制策略,解决空间变化磁化方向的工程实现难题,提出通过局部单元依次充磁和全场测量反馈的技术路线。

1 方法

1.1 仿星器永磁体设计

本文所用永磁体的空间分布形状通过 REGCOIL_PM 程序计算获得。该程序基于电流势方法求解仿星器永磁体设计问题,其核心原理是在预定义的缠绕曲面上引入标量电流势 Φ ,单位法向量 $\mathbf{n}$,通过式(1)描述曲面电流密度分布。

$$\mathbf{K} = \mathbf{n} \times \nabla \Phi \quad (1)$$

该方法采用 Tikhonov 正则化策略,构建包含磁场误差和电流密度约束的目标函数:

$$\chi^2 = \chi^2_B + \lambda \cdot \chi^2_K \quad (2)$$

式中 χ^2_B 是磁场误差项,衡量计算磁场与目标磁场之间的偏差,这是主要优化目标,希望尽可能小;

χ^2_K 是电流密度正则化项,约束曲面电流密度的分布特性,防止解出现工程上无法实现的永磁体磁化强度过大值。通过调节正则化参数 λ 在等离子体表面法向磁场精度与磁化复杂度之间取得平衡。

具体计算流程为:首先输入目标等离子体表面的平衡位形和预设的永磁体内表面曲面几何;随后程序通过求解线性最小二乘问题快速获得最优电流势分布;最后提取电流势等值线作为永磁体的中心轨迹。

1.2 复杂曲面永磁体有限元仿真

1.2.1 永磁体几何模型建立

有限元仿真的首要任务是建立准确的几何模型。如图2所示,本研究中永磁体的几何数据由程序计算获得,其输出包含离散化的永磁体内表面在网格点 (θ, ζ) 处的矢径数据 $r_{in}(\theta, \zeta)$ 、永磁体在网格点 (θ, ζ) 处的厚度 d ,法向量 $\mathbf{n}$,其中 θ 为环向角坐标, ζ 为极向角坐标。在程序运行前需预先设定两个离散化参数,即环向段数 n_θ 和极向段数 n_ζ ,从而将连续曲面离散为 $n_\theta \times n_\zeta$ 个网格点。每个网格点对应一组三维笛卡尔坐标 (x, y, z) ,所有点的坐标构成永磁体的空间数据矩阵。

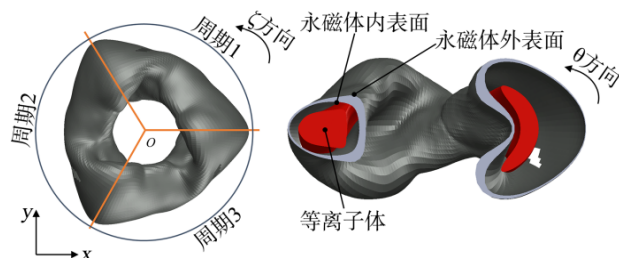


图2 仿星器永磁体结构示意图

Fig. 2 Schematic of stellarator permanent magnet structure

由于仿星器磁体具有复杂的三维扭曲几何形状,且截面尺寸沿轨迹连续变化,直接在数值分析软件中通过参数化建模难度较大且计算效率低。因此本文采用预处理方式,利用MATLAB脚本将离散几何数据转换为STL (Stereolithography) 三角面片网格文件。首先读取离散几何数据,包括永磁体内表面坐标 $r_{in}(\theta, \zeta)$ 、厚度和法向量等。由于永磁体在空间各位置的曲率不同,直接使用输出厚度会产生体积偏差,因此采用式(3)雅可比修正方法对厚度进行校正:

$$d_{corrected} = d \times \left(1 + H \cdot d + \frac{(H^2 + K_{term}) \cdot d^2}{3} \right) \quad (3)$$

式中 H 为平均曲率; K_{term} 为雅可比高阶修正项,通过Fourier展开从磁体内表面几何系数重构获得,该修正考虑了曲面的平均曲率和高阶几何项对体积元的影响。修正后计算外表面坐标,即内表面沿法向外推修正后的厚度距离。修正后的外表面坐标计算为:

$$\mathbf{r}_{out} = \mathbf{r}_{in} + d_{corrected} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (4)$$

STL 网格构建采用结构化剖分策略:对每个网格点,通过其四邻域角点的坐标平均值生成局部四边形面片,每个四边形剖分为两个三角形。内外表面均生成三角形网格,侧面仅在相邻单元厚度差异超过设定阈值时生成,以构建水密模型。最终调用自编写函数将三角面片的顶点坐标、法向量和拓扑连接关系写入二进制 STL 文件。图3为 STL 网格生成的整体流程。

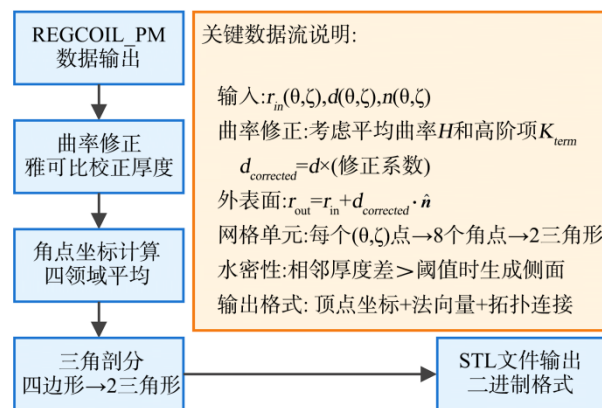


图3 STL 网格构建流程

Fig. 3 STL mesh construction workflow

等离子体边界面同样通过程序输出的数据生成。该数据描述了理想等离子体的嵌套磁面结构,提取最外层磁面 (Last Closed Flux Surface, LCFS) 的三维坐标 $\mathbf{r}_{plasma}(\theta, \zeta)$ 并转换为 STL 格式。在 COMSOL 中将等离子体表面构建为三维实体几何对象,但其材料属性设定为空气 (相对磁导率 $\mu_r=1$), 仅用于提取后续磁场数据而不参与磁场源的产生。

完成 STL 文件生成后,在 COMSOL 中进行几何导入与组装。首先通过“导入”功能分别载入永磁体和等离子体表面的 STL 文件,软件自动识别三角面片网格并重构为实体几何。随后创建外部空气

计算域,考虑到磁场的空间衰减特性和远场边界条件的影响,计算域尺寸应足够大以使边界处的磁场近似为零。根据NCSX构型仿星器的空间尺度(典型特征尺寸约2~3 m),本研究设定外部空气域为20 m×20 m×10 m的长方体区域,相当于磁体几何尺度的5~10倍,确保边界效应可忽略。

永磁体材料选用钕铁硼(NdFeB),其磁性能参数如下:剩磁 $B_r=1.3$ T,相对磁导率 $\mu_r=1.05$,接近真空磁导率,矫顽力 $H_c=980$ kA/m。永磁体的本构关系表示为

$$\mathbf{B}=\mu_0\mu_r(\mathbf{H}+\mathbf{M}) \quad (5)$$

式中 $\mathbf{B}$ 为磁感应强度(磁通密度), $\mathbf{M}$ 为材料的磁化强度矢量, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, μ_0 为真空磁导率。等离子体表面区域和外部空气域均定义为非磁性材料,相对磁导率 $\mu_r=1.0$,不含磁化项。

1.2.2 磁化向量场配置

永磁体的磁化强度矢量 $\mathbf{M}$ 是决定其产生磁场分布的核心参数。与传统均匀磁化的永磁体不同,

仿星器应用中的永磁体需要在空间各位置具有不同的磁化方向,以实现复杂三维等离子体位形的精确磁场拟合。本研究中磁化向量分布由程序预先计算获得,输出为与几何数据对应的离散化矩阵 $\mathbf{M}(\theta, \zeta)$,维度为 $n_\theta \times n_\zeta \times 3$,其中最后一维包含磁化矢量在笛卡尔坐标系下的三个分量 M_x 、 M_y 和 M_z 。

如图4a所示,对计算得到的磁化数据进行初步分析发现,除了部分过薄区域,磁化强度 $|\mathbf{M}|=\sqrt{M_x^2+M_y^2+M_z^2}$ 在整个永磁体结构中数值几乎一致。如图4b、4c所示,磁化方向沿着磁体轨迹呈现连续平滑的变化趋势,不存在突变或间断点,这为后续的插值处理提供了良好的数学基础。磁化方向在三维空间中随 (θ, ζ) 的变化体现了仿星器磁场位形的非轴对称特征。值得注意的是,本研究所用的实例几何在 ζ 方向具有三重周期性,即 ζ 在 $[0, 2\pi/3]$ 、 $[2\pi/3, 4\pi/3]$ 、 $[4\pi/3, 2\pi]$ 三段的磁体几何和磁化分布基本相同,这种周期性是仿星器磁场位形优化的结果。

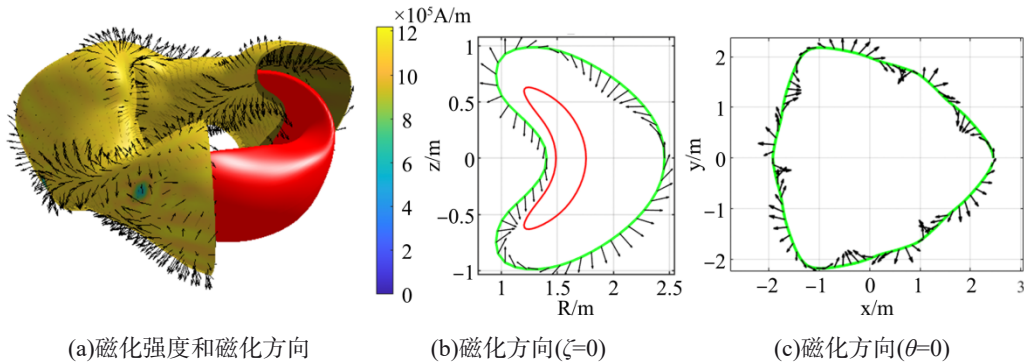


图4 磁化向量场空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of magnetization vector field

1.2.3 仿真求解和结果提取

本研究采用COMSOL中的“磁场,无电流”(Magnetic Fields, No Currents, mfnc)物理场接口进行静磁场仿真。该接口专门用于模拟由永磁体或软磁材料产生的静态磁场分布,适用于无传导电流和无时变电磁感应的场景。

有限元求解完成后,提取等离子体表面的法向磁场分布。在COMSOL中,等离子体表面已构建为独立的几何实体,其边界表面可作为数据提取对象。选择等离子体表面边界,定义提取变量为法向磁感应强度分量。

(θ_0, ζ_0) 处法向磁场大小的计算公式为磁感应强度矢量 $\mathbf{B}_{\text{FEA}}(\theta_0, \zeta_0)$ 与表面单位法向量 $\mathbf{n}_{\text{FEA}}(\theta_0, \zeta_0)$ 的点积:

$$|\mathbf{B}_{\text{n-FEA}}(\theta_0, \zeta_0)| = \mathbf{B}_{\text{FEA}}(\theta_0, \zeta_0) \cdot \mathbf{n}(\theta_0, \zeta_0) \quad (6)$$

式中 磁感应强度矢量 $\mathbf{B}_{\text{FEA}}$ 与表面单位法向量 $\mathbf{n}_{\text{FEA}}$ 均由有限元计算结果得到。式(6)在等离子体表面的每个网格节点上求值,得到 $\mathbf{B}_{\text{n-FEA}}(\theta, \zeta)$ 的分布。

定量评估通过与目标磁场的对比实现。首先对比的是约束等离子体所需的理想法向磁场分布 $\mathbf{B}_{\text{n-ideal}}(\theta, \zeta)$,该法向磁场完全抵消平面线圈和等离子体产生的法向磁场,即在LCFS曲面上法向磁场

恒为0。代表维持等离子体稳定约束的真空磁场边界条件^[3]。定义有限元仿真结果与理想磁场的最大绝对偏差 $E_{\text{ideal}}^{\text{max}}$ 及最大相对偏差 $E_{\text{ideal}}^{\text{max-rel}}$ 分别为:

$$E_{\text{ideal}}^{\text{max}} = \max \{ \mathbf{B}_{\text{n-FEA}}(\theta, \zeta) - \mathbf{B}_{\text{n-ideal}}(\theta, \zeta) \} \quad (7)$$

$$E_{\text{ideal}}^{\text{max-rel}} = E_{\text{ideal}}^{\text{max}} / \left[\max \mathbf{B}_{\text{n-ideal}}(\theta, \zeta) - \min \mathbf{B}_{\text{n-ideal}}(\theta, \zeta) \right] \quad (8)$$

然后对比 REGCOIL_PM 程序计算得到的永磁体产生的磁场 $\mathbf{B}_{\text{n-regcoil}}(\theta, \zeta)$ 。该磁场代表均匀无杂质永磁体在无限精度和无工程约束下应产生的磁场分布。定义绝对误差、相对误差及归一化均方根误差 (Normalized Mean Squared Error, NMSE) 分别为:

$$E_{\text{reg}}(\theta, \zeta) = |\mathbf{B}_{\text{n-FEA}}(\theta, \zeta) - \mathbf{B}_{\text{n-reg}}(\theta, \zeta)| \quad (9)$$

$$E_{\text{reg}}^{\text{rel}}(\theta, \zeta) = E_{\text{reg}}(\theta, \zeta) / \left[\max \mathbf{B}_{\text{n-reg}}(\theta, \zeta) - \min \mathbf{B}_{\text{n-reg}}(\theta, \zeta) \right] \quad (10)$$

$$\text{NMSE} = \sqrt{\frac{1}{n_{\theta} n_{\zeta}} \sum_{i=1}^{n_{\theta}} \sum_{j=1}^{n_{\zeta}} [E_{\text{reg}}^{\text{rel}}(\theta_i, \zeta_j)]^2} \quad (11)$$

NMSE 反映了有限元仿真结果与理想永磁体产生磁场分布结果的偏离程度。

1.3 复杂曲面永磁体增材制造方法

针对仿星器永磁体的应用需求,可选材料主要包括钕铁硼和铝镍钴两类。钕铁硼具有高磁能积,剩磁 B_r 可达 1.2~1.4 T,是目前综合性能最优的商业化永磁材料。但其居里温度较低(约 310~400 °C),需评估仿星器运行时的温升影响。铝镍钴的居里温度高达约 850 °C,温度稳定性优异,剩磁 B_r 约 0.6~1.35 T,矫顽力较低,但适用于高温环境。针对仿星器永磁体的三维扭曲轨迹和变截面特征,采用选区激光熔化等工艺制备永磁体。选区激光熔化工艺采用高能激光束选择性熔化或烧结磁性金属粉末逐层构建三维实体,可直接加工铝镍钴合金粉末或钕铁硼材料^[25-26]。

仿星器永磁体各位置需具有空间变化磁化方向。在增材制造打印阶段不施加外磁场,磁性粉末或晶粒呈随机取向状态使材料处于退磁状态。打印完成后后处理后,根据三维磁化矢量场设计多自由度程控充磁系统实现空间变化的磁化。如图 5 所示,该充磁系统主要包括高精度机械定位单元和可

调向脉冲磁场发生器。定位单元采用多轴联动平台精确定位永磁体。脉冲磁场发生器通过大电容放电产生脉冲强磁场,峰值磁场强度需达到材料剩磁的 3~5 倍。由于相邻单元充磁时会对已充磁区域产生干扰,可采用迭代充磁策略。首次全部充磁至目标值的 80% 左右,测量实际磁化分布后计算偏差并进行二次局部补偿充磁。

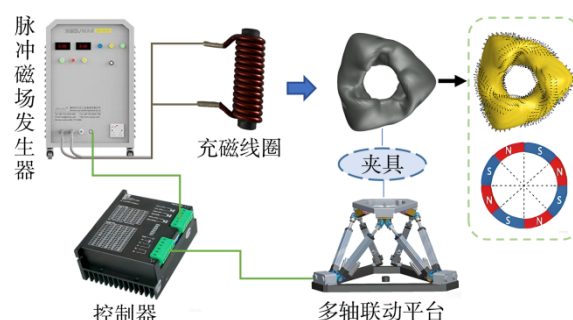


图5 程控充磁系统原理

Fig. 5 Schematic of programmable magnetization system

本文设计的迭代充磁闭环控制策略分为首次预充磁阶段和补偿充磁阶段。首次预充磁阶段,根据目标磁化矢量场对永磁体进行自适应网格划分,磁场梯度剧烈区域采用细密网格,均匀区域采用粗网格,按磁化强度降序排列充磁顺序以减小相邻单元干扰。六自由度充磁头定位平台采用三关节串联结构,每关节包含一个转动和一个平动自由度,通过协同运动将充磁头定位至目标单元并调整姿态,使充磁头端面法向对准曲面法向。脉冲电源通过大电容放电产生峰值磁场强度达材料饱和磁化所需强度(约为剩磁的 3~5 倍)的短时脉冲,完成单次充磁。首次充磁采用预充策略,充至目标磁化强度的 80%,为后续补偿预留调整空间。

补偿充磁阶段通过闭环反馈实现高精度控制。充磁完成后,机械臂夹持霍尔元件阵列在永磁体表面扫描测量全场磁场分布,通过磁场反演算法重构内部磁化矢量场并计算与目标值的偏差。系统建立充磁响应模型,描述充磁参数与磁化增量之间的映射关系,该模型通过实验标定获得。对偏差超标的单元,根据响应模型反向计算所需的补偿脉冲参数,考虑相邻单元的磁场干扰进行优化求解。执行补偿充磁后再次测量验证,形成“测量-偏差计算-补偿执行”的迭代闭环。由于相邻单元充磁时会对

已充磁区域产生干扰,因此需要多次迭代直至将全场磁化偏差收敛至工程要求范围内。

2 结果和讨论

2.1 仿星器永磁体磁场分布仿真结果

对NCSX构型的仿星器永磁体系统完成静磁场仿真。仿真模型包含三维扭曲永磁体轨迹,永磁体材料采用钕铁硼,磁化向量场通过插值函数实现空间变化分布。生成的有限元网格包含约84万个四面体单元,在12核计算机上求解时间约为8 min。

仿真结果如图6所示。等离子体表面法向磁场的磁感应强度 $B_{n-FeA}(\theta, \zeta)$ 三维分布呈现出明显的非轴对称特征,这是仿星器磁场位形的典型特点。 $B_{n-FeA}(\theta, \zeta)$ 在等离子体表面的分布范围为-0.314~0.313 T,绝对值平均值为0.113 T,标准差为0.139 T。从三维云图可以观察到,磁场在环向和极向均存在复杂的空间调制,高场区和低场区呈现螺旋交替分布。仿真结果再现了NCSX构型的三重周期性:将等离子体表面沿极向角 ζ 划分为三个 $2\pi/3$ 区段,各区段的磁场分布模式高度一致,验证了几何模型和磁化配置的正确性。

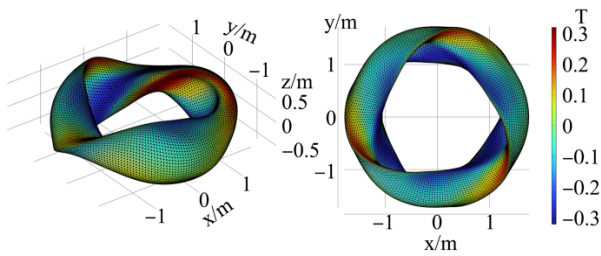
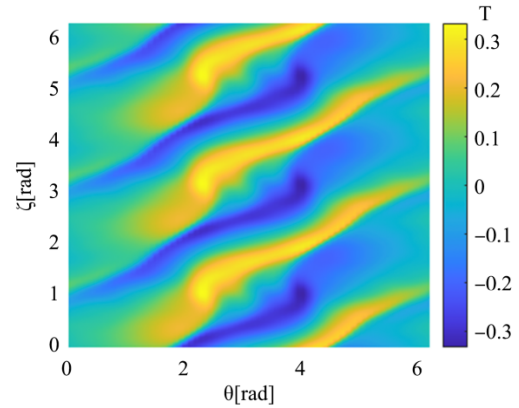


图6 等离子体表面法向磁场三维分布云图

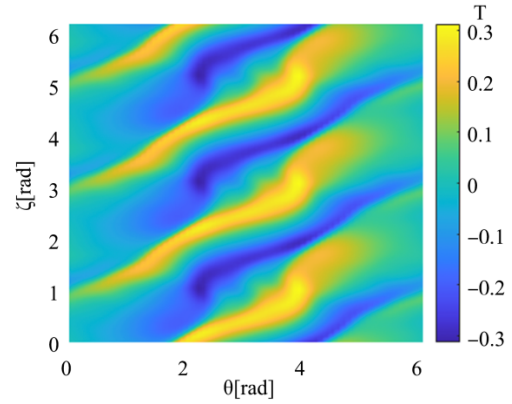
Fig. 6 3D contour map of normal magnetic field distribution on plasma surface

将法向磁场 $B_{n-FeA}(\theta, \zeta)$ 映射到 (θ, ζ) 平面得到的二维云图更清晰地展示了磁场的空间变化规律,如图7(b)所示。在 θ - ζ 参数空间中,磁场呈现出带状分布特征,正负磁场区域交替出现,等高线的走向与永磁体轨迹的投影方向基本一致。沿极向角 ζ 方向,磁场模式每隔 $2\pi/3$ 重复出现。磁场梯度最大的区域出现在 $\theta \approx 3\pi/4$ 和 $\theta \approx 5\pi/4$ 附近,这些区域对应于等离子体截面形状变化最剧烈的位置,需要永磁体产生快速变化的磁场分量以维持等离子体边界

的稳定性。图7a展示的是平面线圈和等离子体产生的磁感应强度分布云图,即所设计永磁体需要消除的法向磁场误差。该磁场分布与永磁体产生的磁场分布对比,二者数值相反,走向一致,验证有限元分析结果的准确性,以及永磁体消除磁场误差这一方案的有效性。



(a)线圈和等离子体产生的磁感应强度



(b)永磁体产生的磁感应强度

图7 法向磁场 θ - ζ 参数空间云图

Fig. 7 Normal magnetic field contour map in θ - ζ parameter space

2.2 磁场精度评估

为定量评估仿真结果的准确性,将有限元计算得到的等离子体表面法向磁场 $B_{n-FeA}(\theta, \zeta)$ 与两组磁场进行了系统对比。对比对象分别为约束等离子体所需的理想法向磁场分布 $B_{n-ideal}(\theta, \zeta)$,以及REGCOIL_PM程序计算得到的永磁体产生的磁场 $B_{n-regcoil}(\theta, \zeta)$ 。由公式(7)、(8)计算得到有限元仿真结果与理想磁场的最大绝对偏差为 $E_{ideal}^{max}=0.030$ T,最大相对偏差为 $E_{ideal}^{max-rel}=4.55\%$,相对偏差在5%以内,满足磁约束聚变对磁场精度的工程要求。

将有限元仿真结果 $B_{n-FeA}(\theta, \zeta)$ 对比REGCOIL_

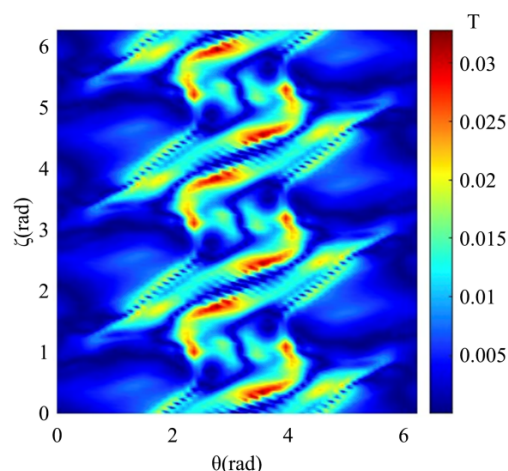
PM 程序计算得到永磁体产生的磁场 $B_{n-regcoil}(\theta, \zeta)$ 。该磁场代表均匀无杂质永磁体在无限精度和无工程约束下应产生的磁场分布。由公式(9)、(10)计算得到绝对误差和相对误差的相关数据,统计结果如图8所示。最大相对误差为4.91%,平均相对误差为1.06%,相对误差标准差为0.93%,82.8%的区域相对误差在2%以内,这表示大部分磁体区域磁场结果准确,且最大偏差满足工程需求。由公式(11)计算得到均方根误差为0.009 4 T,归一化均方根误差为NMSE=1.4%,反映了有限元仿真结果与理想永磁体产生磁场分布结果的偏离程度很小。

误差分布的空间分析进一步揭示了磁场分布的细节。靠近 z 轴中心的位置(θ 在2~4之间)法向磁场误差较大,说明对靠近等离子体区域的约束质量较低。这是更靠近等离子体的位置,该位置附近等离子体表面曲率较大。最大误差出现在 $\theta \approx 3\pi/4$ 和 $\theta \approx 5\pi/4$ 附近,该位置等离子体表面曲率较大且磁场梯度剧烈变化。磁场梯度 $\partial B_n / \partial \theta$ 和 $\partial B_n / \partial \zeta$ 的统计分析表明,磁场峰值位置的定位误差约为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 的角度偏移。这些定量指标为后续的工程优化提供了明确的改进方向。

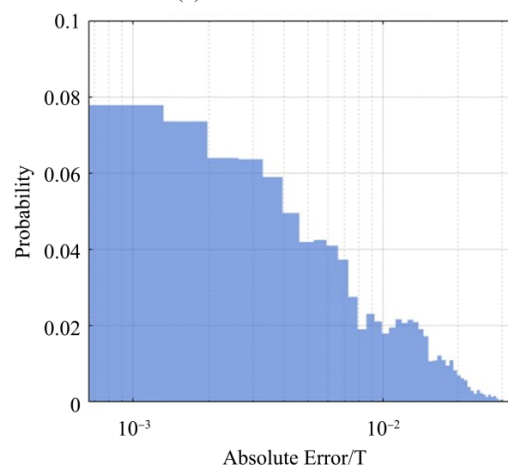
误差产生的主要原因可归结为以下几个方面。首先,几何离散化是不可避免的误差源,理想磁体是表面连续变化的曲面,而 STL 网格化过程将其离散为三角面片,引入了以直代曲的几何偏差。其次,磁化强度的插值过程存在固有误差,尽管采用了三维线性插值,但插值函数在网格节点间的线性近似无法完全重现连续磁化场的高阶变化,特别是在磁化方向快速旋转的区域,插值误差相对更显著。第三,有限元网格的分辨率限制了对磁场细节的捕捉能力,进一步提高精度需付出更大的计算代价。最后,REGCOIL_PM 优化本身基于理想化假设,如无限薄电流面、线性叠加原理,与有限元模型中考虑的实际永磁体体积效应和非线性磁路存在本质差异。

2.3 增材制造方案的工程可行性讨论

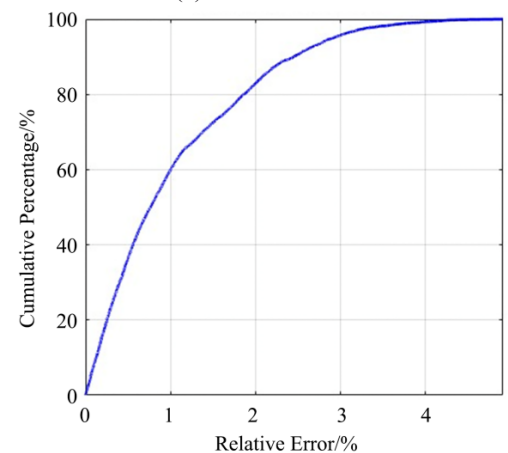
基于有限元仿真结果和误差分析,对本文提出的增材制造方案进行工程可行性评估。几何制造精度是首要关注点。本文将仿真模型中几何模型做微小偏移,或轻微更改几何尺寸,观察得到的法



(a) 磁场误差云图



(b) 绝对误差分布



(c) 相对误差累计

图8 仿真结果误差分布

Fig. 8 Error distribution of simulation results

向磁场分布,以此反推几何精度。仿真误差反推分析表明,为将NMSE控制在5%以内,永磁体结构的空位位置偏差应 <0.8 mm,截面尺寸公差应 <0.5 mm。

激光选区熔化工艺的典型精度为 $\pm 0.05 \sim 0.2$ mm,满足基本要求。此外,本文使用熔融沉积成型(FDM)工艺制备了仿星器永磁体的聚乳酸模型,如图9所示,验证了增材制造工艺在复杂形状成型的潜力。

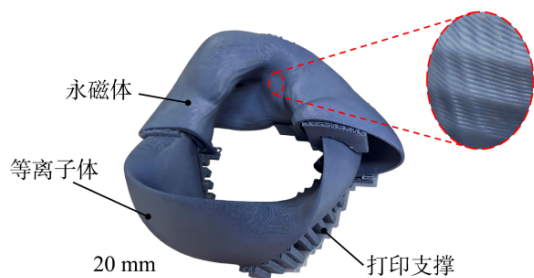


图9 FDM制备仿星器永磁体模型

Fig. 9 Model of stellarator permanent magnet fabricated by FDM

针对NdFeB材料的激光选区熔化(LPBF)工艺,磁性能控制的核心挑战在于冷却速率与相组成的精确匹配。He等^[26]系统研究了激光能量密度对NdFeB微观组织的影响规律,发现当熔池冷却速率超过 3×10^7 K/s时,硬磁相Nd₂Fe₁₄B的体积分数可达78.5%;但冷却速率低于 1.5×10^6 K/s时,软磁 α -Fe相大量析出,严重降低矫顽力。微观组织呈现显著的熔池梯度特征:顶部区域超快冷却促进晶粒细化至1~2 μ m,而底部形成约40 μ m厚的粗晶区伴随 α -Fe富集。LPBF成形NdFeB的另一关键挑战是裂纹控制,由于材料本征脆性和热应力集中,凝固收缩与热变形的协同作用导致裂纹难以愈合。该研究通过有限元模拟和凝固理论分析,提出裂纹萌生率判据,指出优化激光功率、扫描速度和扫描间距可实现95.8%相对密度和优化的相组成平衡。这些发现为复杂曲面永磁体的增材制造提供了重要的工艺参数指导和缺陷控制策略。

磁化方向控制是增材制造永磁体面临的一大技术挑战。程控充磁系统需具备六自由度定位能力(三个平动+三个转动),定位精度0.1 mm和0.05°,这对机械系统提出了极高要求。更严峻的问题是充磁过程的交叉耦合效应:对某一局部单元充磁时产生的强磁场(峰值>3T)会对周围已充磁区域产生部分退磁或重新取向,导致实际磁化分布偏离设计目标。仿真估算表明,相邻5 cm范围内的单元会受到约15%~20%的磁化强度干扰。需在每次迭代后测量全场磁化分布,反演计算偏差并重新规划充磁

路径,整个过程可能需要3~5次迭代才能收敛。

综合上述分析,复杂曲面永磁体的增材制造方案在技术上具有可行性,但距离工程实用化仍需解决程控充磁的精度控制、成本优化和安全操作等关键问题。

2.4 复杂曲面方案与标准化永磁块阵列的对比分析

为凸显本文提出的复杂曲面永磁体方案的特点,现将其与现有标准化立方体永磁块阵列方案进行对比分析。Zhang等^[3]针对ESTELL构型开发了基于极化矢量函数的连续-截断优化方法,采用25 467个4 cm边长立方块、磁化方向限定为6个面法向,通过迭代优化获得等离子体表面法向磁场相对误差0.2%的结果。该方案的优势在于:永磁块可批量化生产,制造成本较低;装配允许人工操作,工程实施相对成熟。但标准化方案存在固有局限:①立方体离散排列在拟合仿星器扭曲轨迹时产生"阶梯效应",在高曲率区域需增加永磁块数量以补偿局部磁场梯度,导致材料利用率较低;②连续-截断法在允许磁化方向较少时引入显著截断误差,需大量迭代才能收敛;③磁化方向离散化限制了对复杂磁场分布的精确拟合能力。相比之下,本文复杂曲面方案通过连续优化几何轨迹和磁化分布,理论上可减少材料用量并提升磁场拟合精度;增材制造方案可以缩短设计和制造周期。

但工程实现面临两大挑战:①空间变化磁化方向的程控充磁技术尚处于实验室阶段;②增材制造单位成本显著高于传统加工。综合而言,标准化方案适用于聚变装置的批量生产,而复杂曲面方案在中小型科研仿星器的快速原型验证中具备独特优势,特别是在验证新型磁场位形优化算法时可大幅缩短设计-验证周期。

3 结论

本文针对仿星器复杂曲面永磁体开展了有限元仿真分析和增材制造方案研究,获得以下主要结论:

(1)建立了仿星器永磁体三维静磁场有限元仿真框架。通过STL几何导入、插值函数实现空间变

化磁化向量场等关键技术,成功模拟了NCSX构型仿星器中永磁体结构的磁场分布。仿真模型包含84万四面体单元,求解时间8 min,计算效率满足工程应用需求。

(2)仿真结果表明,永磁体系统在等离子体表面产生的法向磁场与REGCOIL_PM计算永磁体的磁场及与理想等离子体约束磁场的误差均在5%的可接受范围内。

(3)提出了基于增材制造和多方向磁化的永磁体工程制造技术路线,采用选区激光熔化和程控充磁系统实现永磁体复杂曲面成型和空间变化磁化方向。仿真误差反推分析表明,增材制造工艺能满足仿星器中复杂曲面永磁体的精度要求。

本研究为仿星器复杂曲面永磁体的设计、仿真和制造提供了完整的方法体系和技术方案,对推动仿星器永磁体调控磁场分布技术的创新发展具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 王志斌,沈炀,余羿,等.我国磁约束核聚变能源的发展路径、国际合作与未来展望[J].南方能源建设,2024,11(3):1-13.
WANG Z B, SHEN Y, YU Y, et al. The Development Path, International Cooperation and Future Prospects for Magnetic Confined Fusion Energy in China [J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(3): 1-13.
- [2] 张家龙,宋彭,瞿体明.磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述[J].发电技术,2024,45(6):995-1015.
ZHANG J L, SONG P, QU T M, et al. Overview of Magnetic Confinement Controlled Nuclear Fusion Reactors and Superconducting Magnet Technologies [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(6): 995-1015.
- [3] ZHANG X, CHEN D, XU G, et al. A new continuous optimization method of standardized cubic permanent magnets for stellarators [J]. Nuclear Fusion, 2025, 65(2): 26060.
- [4] RUTKOWSKI A, HAMMOND K, ZHU C, et al. A novel scheme for error field correction in permanent magnet stellarators [J]. Nuclear Fusion, 2023, 63(2): 26027.
- [5] 黄好,马立.聚变能的发展现状[J].中国科技信息,2023(4):120-122.
- [6] ZHU C, HAMMOND K, RUTKOWSKI A, et al. PM4Stell: a prototype permanent magnet stellarator structure [J]. Physics of Plasmas, 2022, 29(11): 112501.
- [7] QIAN T M, CHU X, PAGANO C, et al. Design and construction of the MUSE permanent magnet stellarator [J]. Journal of Plasma Physics, 2023, 89(5): 955890502.
- [8] MADEIRA M, JORGE R. Tokamak to stellarator conversion using permanent magnets [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2024, 66(8): 85008.
- [9] HELANDER P, DREVLAK M, ZARNSTORFF M, et al. Stellarators with permanent magnets [J]. Physical Review Letters, 2020, 124(9): 095001.
- [10] HAMMOND K C, ZHU C, CORRIGAN K, et al. Design of an arrangement of cubic magnets for a quasi-axisymmetric stellarator experiment [J]. Nuclear Fusion, 2022, 62(12): 126065.
- [11] HAMMOND K C, ZHU C, BROWN T, et al. Geometric concepts for stellarator permanent magnet arrays [J]. Nuclear Fusion, 2020, 60(10): 106010.
- [12] HAMMOND K C, KAPTANOGLU A A. Improved stellarator permanent magnet designs through combined discrete and continuous optimizations [J]. Computer Physics Communications, 2024, 299: 109127.
- [13] KAPTANOGLU A A, QIAN T, WECHSUNG F, et al. Permanent-magnet optimization for stellarators as sparse regression [J]. Physical Review Applied, 2022, 18(4): 44006.
- [14] LANDREMAN M. An improved current potential method for fast computation of stellarator coil shapes [J]. Nuclear Fusion, 2017, 57(4): 46003.
- [15] LANDREMAN M, ZHU C. Calculation of permanent magnet arrangements for stellarators: a linear least-squares method [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2021, 63(3): 35001.
- [16] QIAN T, ZARNSTORFF M, BISHOP D, et al. Simpler optimized stellarators using permanent magnets [J]. Nuclear Fusion, 2022, 62(8): 84001.
- [17] ZHU C, HAMMOND K, BROWN T, et al. Topology optimization of permanent magnets for stellarators [J]. Nuclear Fusion, 2020, 60(10): 106002.
- [18] ZHU C, ZARNSTORFF M, GATES D, et al. Designing stellarators using perpendicular permanent magnets [J]. Nuclear Fusion, 2020, 60(7): 76016.
- [19] LU Z, XU G, CHEN D, et al. Development of advanced stellarator with identical permanent magnet blocks [J]. Cell Reports Physical Science, 2022, 3(1): 100709.
- [20] XU G S, LU Z Y, CHEN D H, et al. Design of quasi-

- axisymmetric stellarators with varying-thickness permanent magnets based on fourier and surface magnetic charges method [J]. Nuclear Fusion, 2021, 61 (2): 26025.
- [21] YU G, LIU K, QIAN T, et al. Quasi-single-stage optimization for permanent magnet stellarators [J]. Nuclear Fusion, 2024, 64(7): 76055.
- [22] 徐浩睿,王苏鑫,李留江,等. 聚变装置高温超导磁体系统电磁仿真方法研究[J]. 发电技术, 2024, 45(6): 1030-1038.
- XU H R, WANG S X, LI L J, et al. Research on Electromagnetic Simulation Method of Fusion High Temperature Superconducting Magnet System [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(6): 1030-1038.
- [23] DONG H, MING G, HE K, et al. Interplay of the laser energy density and microstructure on the properties of NdFeB manufactured by laser powder bed fusion: a review [J/OL]. Journal of Materials Chemistry C, 2025: 13, 23731-23765.
- [24] CHEN Y, XIONG C, LI Y. Additive manufacturing of rare earth permanent magnetic materials: research status and prospects [J]. Metals, 2024, 14(4): 446.
- [25] DUSSA S, JOSHI S S, SHARMA S, et al. Additively manufactured alnico permanent magnet materials—a review [J]. Magnetism, 2024, 4(2): 125-156.
- [26] DONG H, HE K, XU H, et al. Defect-structure-property relationships in laser powder bed fusion processed NdFeB magnets: the dominant role of laser energy density [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 344: 119018.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第74页

- Heat Transfer Optimization Sustainability Perspective [J]. Inventions, 2024, 9(3): 60.
- [11] Niknam S A, Mortazavi M, Li D. Additively manufactured heat exchangers: a review on opportunities and challenges [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 112(3/4): 601-618.
- [12] 马青原,杜沛南,彭英博,等. 金属增材制造技术在核工业领域的应用与发展[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(01): 86-94.
- MA Q Y, DU P N, PENG Y B, et al. Application and development of metal additive manufacturing technology in the field of nuclear industry [J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(01): 86-94.
- [13] 袁宏,何戈宁,李磊,等. 3D打印技术在核电领域的发展应用情况综述[J]. 科技视界, 2020(17): 118-122.
- YUAN H, HE G N, LI L, et al. Overview of the development and application of 3D printing technology in the nuclear power field [J]. Science & Technology Vi-
- sion, 2020(17): 118-122.
- [14] Chang S W, Jan Y J, Liou J S. Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(5): 506-518.
- [15] Esmacilzadeh E, Almohammadi H, Nokhosteen A, et al. Study on heat transfer and friction factor characteristics of γ -Al₂O₃/water through circular tube with twisted tape inserts with different thicknesses [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 82: 72-83.
- [16] Dittus F W. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type [J]. Univ of California Pub Eng, 1930, 2(13): 443-461.
- [17] Chen S L, Gerner F M, Tien C L. GENERAL FILM CONDENSATION CORRELATIONS [J]. Experimental Heat Transfer, 1987, 1(2): 93-107.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>